低周波音波による積雪検知

著者	木村 忠志
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	5
ページ	41-49
発行年	1971-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000683

国立防災科学技術センター研究報告　第5号　1971年3月

551.508.77:534.838

低周波音波による積雪検知

木村忠志
国立防災科学技術センター雪害実験研究所第2研究室

Snow Cover Detection by Low Frequency Sound

By

Tadashi Kimura

Institute of Snow and Ice Studies, Nagaoka

Abstract

The value of sound velocity in snow cover is smaller than that in air, and accordingly in the case of the same length of transmission, the sound phase in snow cover is the more behind the sound phase in air, when the longer the transmission length is.

In the present paper, it is shown that a snow cover detector based on the above fact has been able to detect the new snow cover from 2 to 30 mm deep with an accuracy of ±1 mm.

The main part of this detector is a howling oscillator including a speaker and a microphone, and these sonic components are set opposite to each other in horizontal direction on the snow surface to be measured, so that this detector is not affected by raindrops or falling snow flakes, and detects the snow cover only.

1. まえがき

路上積雪あるいは屋根上積雪（屋根雪）に対して，電力その他による処理装置（木村忠志・清水増治郎，1969）を経済的に作動させるためには，積雪の程度に応じて処理装置を作動させる自動制御機構が併用されねばならない．このために，積雪を検出し，その程度を判断する積雪検知装置が必要になる．現在のところ，降雪あるいは積雪の光学的性質または電気的性質，さらには雪をとかして水にした場合の電気抵抗の変化などを利用した積雪検知装置が開発されていて，ある程度実用に供されている．しかし，光学的なものには光学系の汚染とか外光による動作不安定があり，電気的性質を利用するものにも，検出電極の汚染による動作不安定があったり，雨と雪を区別した動作ができないといった欠点があって完全なものはみあたらない．本論文の積雪検知装置は，積雪層内の音速が空気中にくらべて小さいことを利用したもので，検出部分の汚染によって動作が乱されないほか，積雪のみによって作動し，空中を落下中の雪，雨に対して全く反応せず，また積雪層を乱すことがないという特徴をもっている．試作装

置は外来雑音に対する処置を全く講じていないので，実用段階のものではないが，室内実験および野外実験において，積雪の深さ 8mm の積雪を ±1mm の精度で検出した．

2. 動作原理

図1に積雪検知装置の原理を示す．図中の Sp はスピーカ，Mic はマイクロホン，A は低周波増幅器で，このようにスピーカとマイクロホンを向かいあわせに配置し，増幅器に接続すると，ハウリング現象により回路が発振状態になり，回路の構成要素によって定まる一定周波数の低周波音波が，スピーカから発生する．この音波の一部は直線 or を通ってマイクロホンにはいり，発振を維持する入力を増幅器にもたらす．一方，他の一部は点線で示した経路を進んで雪面の i 点で積雪層 S にはいり，積雪層の底面の t 点で反射板 Re に当たって反射し，再び雪面の i′ 点より空気中に出た後，マイクロホンに達する．このとき直接スピーカから来た音波と，積雪層内部を通ってマイクロホンにとどいた音波との間に，180°±60° の位相差がある場合には，両者が打ち消し合うのでマイクロホンの音響入力が弱まり，位相差が 180° に近い場合には発振が停止する．反射板上に積雪がない場合に，間隔 D を調整して，発振停止状態を作り出すことは後述するようにきわめて容易であるが，D の値を発振停止状態よりさらに小さくすると，反射波の経路が短くなり，直接波との位相差が 180° よりずれるので発振が再開する．この状態で反射板上に雪が積もると，新積雪層内では，音速が周波数にあまり関係なく 277 m/sec～240 m/sec（大浦浩文，1953 a，1953 b；石田完，1956）で，一波長の長さが空気中におけるよりも短いので，積雪の深さ C がある値に達すると直接波と反射波の位相差が 180° に近くなって，発振が停止する．すなわち，スピーカとマイクロホンの間隔 or と，反射板との間隔 D を適当な一定値にしておくことにより，反射板上の積雪を，発振停止により検知できるはずである．ここで問題になるのは i および i′ 点における音波の反射と，積雪層の吸音作用による反射波の減衰で，これが大きいと r 点において直接波を打ち消しきれなくなるが，新積雪面は垂直に入射した低周波の音響エネルギーの 98.5% を吸収し（大浦浩文，1953 a），また新積雪層内の数 cm 程度の経路では，吸音作用による減衰が非常に少ないことも，100 Hz～10 kHz の白色雑音についてたしかめられている（石田完，1964）．

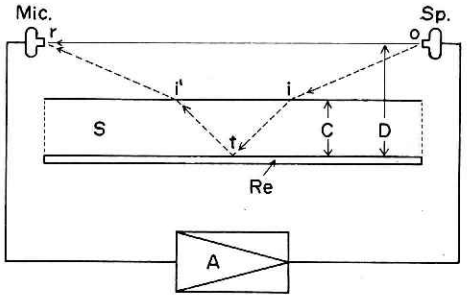


図 1　積雪検知装置原理

3. 室内実験

以上の原理にもとづいて，低温実験室内に実験装置を構成し，動作実験を行なった．写真1

にその状況を示す．中央に向きあわせて，マイクロホンとして小型のクリスタルレシーバ，スピーカとして小型のマグネチックレシーバを，それぞれあわゴムを介して固定し，両者を増幅器につないで発振させた．一方，12cm 角に切った厚さ 25mm のスタイロフォーム板の上に，いろいろな厚さに積もらせた自然積雪を写真のように下方から接近させ，発振の停止点および開始点の分布を調べた．増幅器にはテープレコーダを用い，雪のないときに発振が維持される最低限に増幅度を絞って実験を行なった．このときの増幅度はほぼ 60dB であった．また，スピーカとマイクロホンとの間隔は 10cm とした．発振周波数は 5kHz になった．

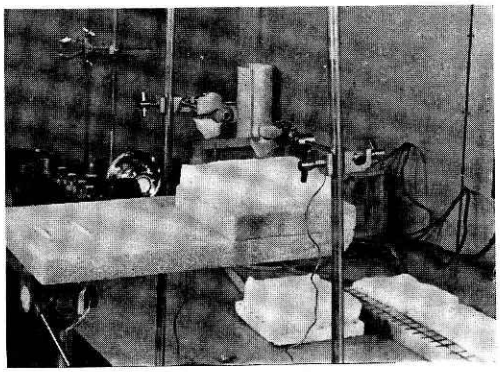


写真 1　動作実験

室内実験の結果を図2に示す．縦軸には反射板との間隔 D をとり，横軸にスタイロフォーム板上の積雪の深さ C をとった．白丸は発振が停止状態から発振状態になった場合，黒丸はその逆の場合で，この二つの状態の間には D にして 2mm 程度の幅をもつ不安定な領域が存在する．図中 ON と記した部分では発振するが OFF の領域では発振しない．たとえば，D を矢印で示した 35mm にした場合，積雪の深さが 9mm 以上では発振が停止し，7mm 以下にすると発振が始まる．この不安定領域は，ハウリング現象に認められる一種のバックラッシュによるものと思われるが，これについての解析は行なわなかった．交互に ON 領域と OFF 領域が認められることについては後述する．また，図中で点線の円でかこんだ測定結果は，直接波，反射波のいずれもが積雪層内を通っている場合であって，他と区別されるべきであろう．

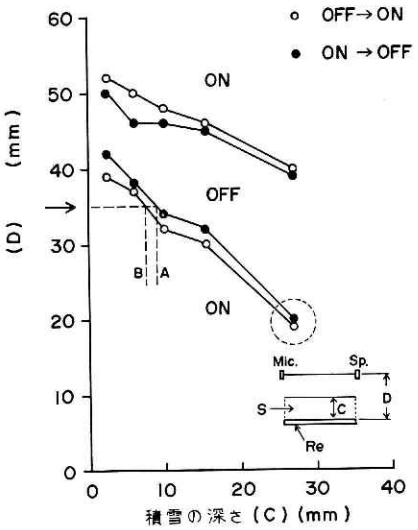


図 2　積雪の深さと発振開始（ON）および発振停止（OFF）

4. 野外実験

室内実験の結果に基づいて，野外実験装置を構成した．図3にそのブロック線図を示す．野外実験装置は室内実験装置に点線内の回路をつけたもので，発振出力の一部を低周波増幅器 A_2 で増幅してリレー R を作動させておき，発振停止と同時にこのリレーを開いてランプ L をともし，発振停止を報知させた．また，受雪板をかねる反射板には，10cm 角のネサ被膜によ

る導電性ガラスを用い，ランプの点燈と同時にスライダック Sd で調節された電流をネサ被膜に流してこれを発熱させ，積雪層の下部をとかして積雪深を減少させ，発振を再開させるようにした．ネサ被膜による導電性ガラスは近赤外域までほぼ透明であり，日射を受けて昇温しにくいので日中でも雪が積もりやすく，また発熱体として作用する表面の SnO_2 の被膜が機械的に強いので，このような使用目的には適当である．野外実験装置の二つの増幅器とリレー回路は，ひとまとめにして小型のシャーシーに組みあげ，機動性をもたせた．図4にその回路図を示す．発振増幅器（A_1）は1個の厚膜集積回路増幅器に，市販トランジスタラジオの出力回路をつないだもので 60 dB 以上のゲインをもっているが，雑音が多く，普通の増幅器としては使用できない．しかし，ハウリングオシレータ用としては充分役にたち，5.1 kHz の安定した正弦波を発振した．ハウリングオシレータの発振周波数は，マイクロホンとスピーカの特性によって主としてきまるようである．リレーの増幅器（A_2）はトランジスタ1個を用いた簡単な直流増幅器で，これの入力は，発振出力の一部を，最もインピーダンスの低い出力回路から整流して得た．

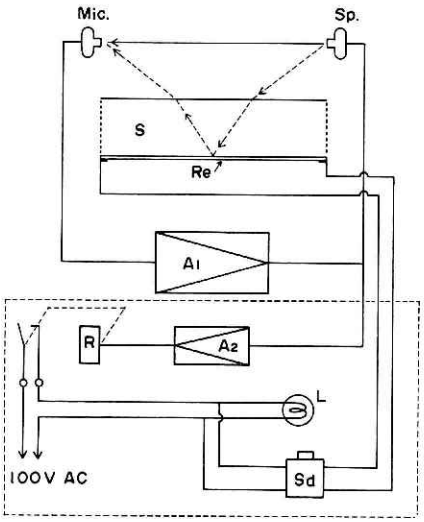


図 3　実験装置の構成

写真2に野外実験装置の検知部を示す．これはスピーカとマイクロホンおよび反射板をひとまとめにしたもので，スピーカとマイクロホンは室内実験で用いたものに，それぞれアルミハクでおおったスタイロフォームの屋根をかぶせて使用し

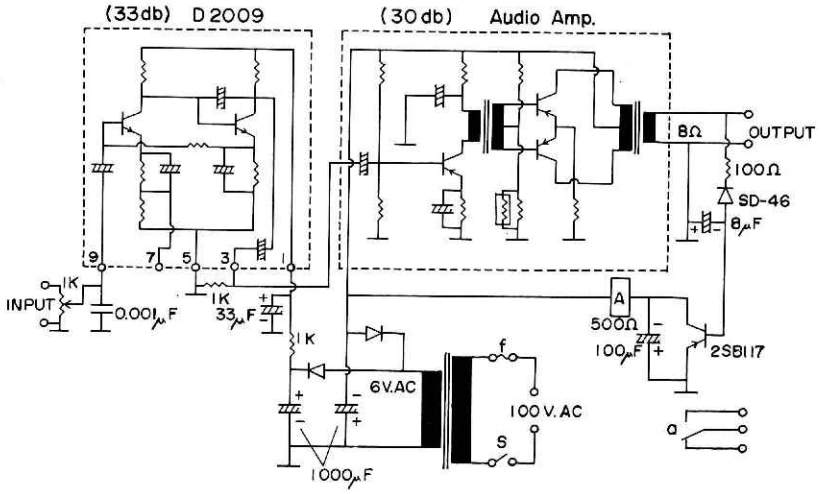


図 4　増幅器およびリレー回路

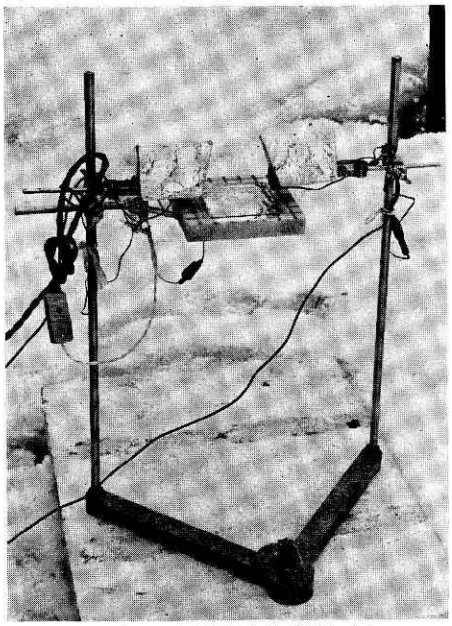


写真 2 野外実験装置検知部

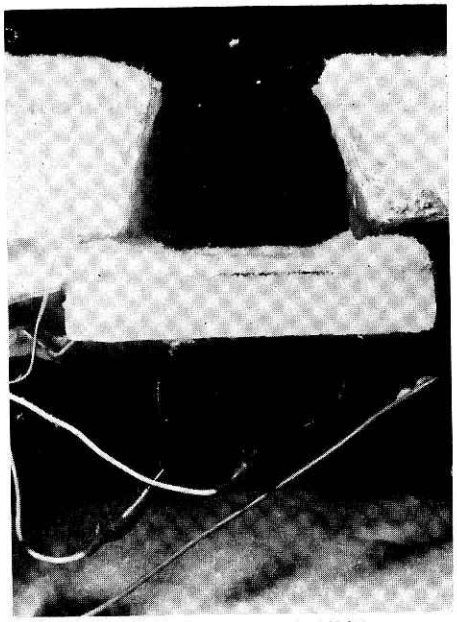


写真 3 反射板上の残雪状況

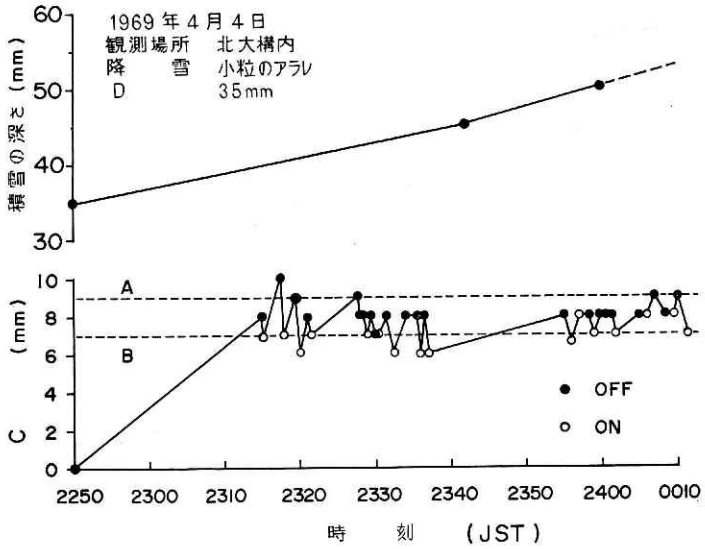


図 5 装置付近の積雪の深さと反射板上の積雪の深さ

た．両者の間隔は室内実験と同じく，10cm とした．反射板のネサガラスは発熱面を下側にして写真のようにスタイロフォームのわくに固定し，前方に少しかたむけて融解水が流れおちるようにした．

野外実験装置による実験は，3月下旬から4月上旬にかけて，長岡ではすでにオフシーズンなので札幌市の北大構内で行なった．このときは，検知部のそばに検知部のヒータと連動する

ランプを設置し，これの点滅によって作動状況を判定した．また，検知部から 1.5m 離れたところに，50cm 角のフォームスチレン板を水平に置き，この上に積もる積雪の深さを検知部周囲の積雪の深さとした．検知部の反射板上の積雪の深さは，水平方向から反射板を写真にとって計測した．写真3にその一例を示す．ヒータのきいている受雪板中央部の積雪の深さが，周辺部にくらべて小さいことが認められる．右側がマイクロホンで左側がスピーカである．両者の間隔は室内実験にあわせて，10cm とした．また，D は図2に示した矢印にあわせて，35mm とした．

図5は野外実験装置の実験結果をまとめたもので，縦軸は積雪の深さと反射板上の積雪の深さ C の値，横軸は時刻である．A および B の点線は図2のものに対応し，C の値が A を越えれば発振は停止し，B 以下になれば発振が始まることになる．C を測定するための写真は，ヒータの開閉を表示するランプが消燈した後30秒以上ともらなかったとき，および30秒以上消燈した後点燈したときに撮影し，それぞれ OFF，ON のときの C の値とした．両者の間の点燈状況は，装置の動作が不安定領域であるため，ひんぱんに点滅をくりかえし，容易に判定できた．図中の黒丸はヒータがはいったとき，白丸は断たれたときの C の値を示す．多少のずれはあるが，室内実験の結果とよく一致した動作をしているといえよう．周囲の積雪の深さは 35mm から 50mm まで増加しているが，反射板上の積雪の深さは 8mm±1mm の程度に保たれたといえよう．実際に装置を動作させてみると，A, B 間の不安定領域の存在はまことにやっかいなもので，このために，ヒータで積雪の深さを減らすよりも，ワイパのようなもので，発振停止と同時に一気に反射板上の積雪をとりのぞくほうが実用的と考えられる．

5. 動作機構の確認

室内実験および野外実験によって，図1で予想した機構で，装置が作動していることがほぼたしかめられたが，これを積雪のない状態で実験し，レシーバの位置における直接波と反射波の干渉をたしかめるとともに，図2に認められた ON 領域と OFF 領域の発生原因を究明する目的で，図6にブロック線図を示す装置により，室内実験を行なった．操作の手順を図6について説明する．低温室内の実験にあわせて，周波数 5kHz の正弦波を低周波発振器で発生させ，これで直接スピーカ Sp を駆動する．このためスピーカは内部インピーダンスが高いものでなくてはならないので，マイクロホンと同じく，内部インピーダンス 250kΩ の市販のクリスタルレシーバを用いた．反射板は 30cm 角のアクリル

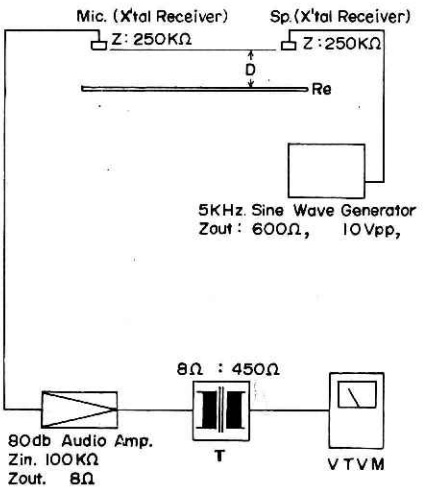


図 6　作動機構実験装置の構成

板で，反射波と直接波は，マイクロホンによって電気信号に変換され，増幅度 80 dB の低周波増幅器によって増幅される．この増幅器にはテープレコーダを利用した．低周波増幅器の出力は，トランス T により昇圧し，真空管電圧計で計測した．反射板とマイクロホンおよびスピ

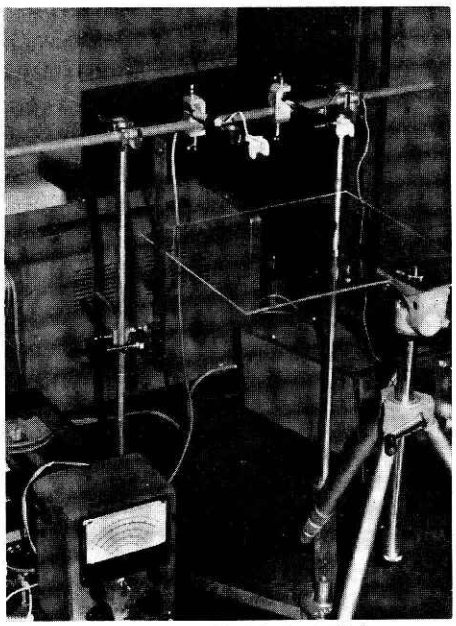


写真 4a 作動機構実験（下向）

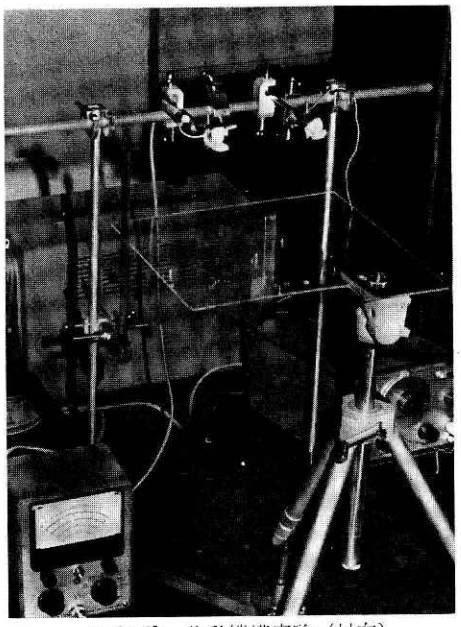


写真 4b 作動機構実験（対向）

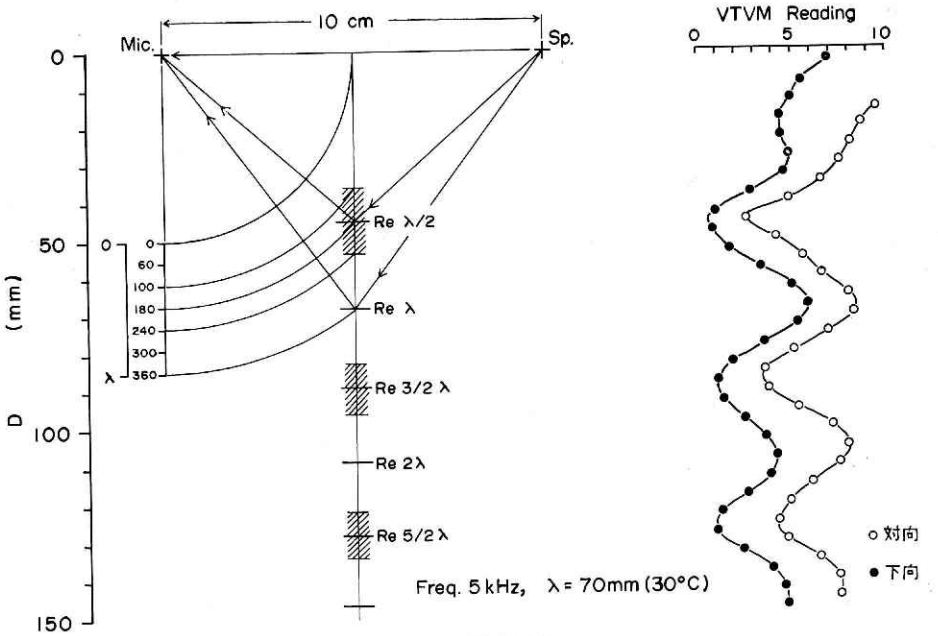


図 7 作動機構解析

ーカの間の距離 D は 5mm きざみに変え，その都度，真空管電圧計の指示値を記録した．

実験状況を写真 4a および 4b に示す．この実験は常温の実験室で行なった．写真 4a はマイクロホンとスピーカを同じ高さで下向きに固定した場合である．反射板はエレベータ3脚につけて上下させ，スタンドに固定した 1mm 目のものさしで距離 D を測定した．写真 4b はマイクロホンとスピーカを向かい合わせにした場合で，下向きと向かい合わせと2種類の配置について実験したのは，スピーカが点音源でなく，マイクロホンも受音点ではないので，両者の結果を比較して，等価的な点音源および受音点の位置を定めるためで，この結果マイクロホンおよびスピーカの前方3mm の位置が，等価的な受音点および点音源になることが判明した．そこで，等価的な受音点および点音源の間隔を 10cm にして実験を行なった．

この実験結果を図7に示す．このときの室温は 30°C で，5kHz の音波の波長は 70mm になる．縦軸にマイクロホンおよびスピーカから反射板までの距離 D をとった．これは左右の図について共通する．左側の図は，10cm へだてて水平に配置した点音源と受音点と，その下方に設置した反射板 Re の間の，直接波と反射波の経路を作図したもので，たとえば D がマイクロホンとスピーカの間隔 10cm の半分の 5cm から 1/2 波長だけ長い，85mm の半径の円を，受音点を中心として描き，これが中心線と交わる位置 Re λ に反射板を水平に置いたとすると，このとき受音点に達した反射波と直接波の間には，360° の位相差があり，相互に強め合うので，受音点の音響入力は極大値となるはずである．また，受音点から 50mm+(1/4)×(波長) の半径で描いた円できめた位置 Re $\lambda/2$ に反射板がある場合には，直接波と反射波の位相差が受音点において 180° になり，相互に打ち消し合うので受音点の音響入力は極小値になると予想される．同様にして，反射波と直接波の弱め合う位相差の範囲，180°±60° に相当する反射板の位置は，斜線で示した範囲に定められる．この斜線範囲のうち，最上部の Re $\lambda/2$ を中心とする部分は，D が 35mm から 55mm の間に位置している．一方，図2において，積雪の深さ C がゼロの場合の OFF 領域は，D がほぼ 40mm から 50mm の間に位置していて，最上部の斜線範囲の中央部に位置している．したがって，図2に現われた OFF 領域は，斜線範囲の存在によって生じたものとみなすことができる．以上の現象は波長の整数倍で D の増加方向にくり返されるが，この図では3波長まで示した．

右側の曲線は，横軸に指示値をとって示した真空管電圧計の値の変化で，白丸はマイクロホンとスピーカを向きあわせにしたとき，黒丸は下向きにしたときのもので，左側の作図で予想した位置に，極大値と極小値の位置がよく一致している．これは図1の着想どおり，装置が作動していることをうらづけるものである．

6. 要　　約

積雪層の存在を検知する装置を，低周波のハウリングオシレータにより構成し，±1mm の精度で深さ 2～30mm の新積雪層を検出した．また，動作機構を実験的に解析した結果，こ

の装置の積雪検知動作が，積雪層内外の音速の相違によって生ずる，積雪層の内外を伝搬した音波の位相差の検出が基本になっていることが判明した．

低周波音波による積雪検知は，積雪層のみによって作動し，積雪層を乱すことがなく，量的な検知が可能な点で，在来の装置に認められない特徴をもっているが，これの実用化については，外来雑音による誤動作を防止する機構が開発されなくてはならない．これは今後の問題である．

謝　　辞

野外実験装置による実験に際して，北海道大学理学部地球物理学科第二講座の施設を借用し，あわせて，孫野長治教授よりご助言をいただいた．以上をしるして謝意を表明する．

参 考 文 献

1) 木村忠志・清水増治郎 (1969)： 屋根雪処理に関する研究 (第1報)．日本積雪連合資料，No. 94.
2) 大浦浩文 (1953a)： 積雪表面に於ける音の反射．低温科学，Ser. A, **9**, 179—185.
3) 大浦浩文 (1953b)： 積雪中の音速．低温科学，Ser. A, **9**, 171—178.
4) 石田　完 (1956)： 積雪の音響インピーダンス．低温科学，Ser. A, **15**, 81～91.
5) 石田　完 (1964)： 積雪の音響特性．低温科学，Ser. A, **22**, 59—72.

(1969年12月10日原稿受理)